

氏名	ひがき かんじ 檜 垣 貫 司
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	論工博第3732号
学位授与の日付	平成15年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	揮発性有機塩素化合物汚染地盤の生石灰を用いた浄化技術に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 嘉門雅史 教授 大西有三 教授 森澤眞輔

論文内容の要旨

広域にわたる土壌・地下水汚染として、揮発性有機化合物(VOC)による汚染の拡大が知られている。VOCは一般に密度が水よりも大きいことから地下深部へ拡散し、しかも汚染が既に長期にわたっていることから重大な地下水汚染として認識されている。わが国に一般的な軟弱粘土地盤においても現在では著しい汚染が見られ、このような地盤における浄化対策手法の確立が喫緊の課題となっている。本論文では、粘性土地盤のVOC汚染を対象とし、わが国独自の地盤改良工法を援用して生石灰の地盤中での発熱固化作用に基づいた浄化工法の開発を行い、その有効性の評価と設計手法の確立を試みたものであり、以下の7章からなっている。

第1章は序論であり、本研究の背景として近年問題となっている地盤汚染事例とその浄化に関する法規についてまとめている。揮発性有機化合物で汚染された地盤の浄化・修復技術として、わが国の地盤環境に適合した手法開発の重要性を詳述した。

第2章では対象とした揮発性有機化合物の物性と地中での存在形態とについて詳細に整理するとともに、汚染の発覚経緯、汚染形態、既存浄化技術等についての得失を取りまとめ、わが国独自技術の開発部位を明確にした。

第3章では生石灰混合による汚染地盤の基礎的浄化実験を実施したものである。VOCで汚染された地盤の経済的で効果的な浄化方法として、これまでは多くの現場で真空抽出法が適用されていた。しかしながら、汚染した粘性土に対しては効率が著しく低下し、適用が難しい技術であることがわかり、新しい浄化技術が期待された。これに対する一つの解決策として、原位置で生石灰を混合する方法を考案し、以下の基礎的室内実験結果を得た。

1) 生石灰の水和反応熱によって地盤は100°C近くまで加熱され、多くのVOCは沸点以上になることから容易に蒸発する。さらに、含水比の低下と粘性土の攪乱により、VOCはさらに揮発しやすくなり浄化が促進される。

2) トリクロロエチレンは、アルカリ雰囲気中で加熱されると有害性がさらに高いジクロロアセチレンを生成することが知られており、この物質の生成条件を室内試験で検証した。その結果、汚染粘性土に生石灰を添加して混合すると、この物質が極微量生成するが、非常に不安定であるために直ちに分解して安定化することを明らかにした。

第4章では生石灰と汚染土の反応モデルについて検討した。通常は浄化しにくい粘性土へも適用しうることを第3章で明らかにしたことを受けて、真空抽出法で作成した熱力学的平衡モデルを用いて浄化予測を行った。

1) 解析から、土の発熱温度、含水比、さらに、汚染物質の濃度を得ることができる。

2) 粘性土の場合、生石灰を添加することで浄化時間の短縮効果が大きい。

3) 生石灰添加量が大きくなると発熱温度は高くなるが、粘性土よりも砂質土の方が質量が高いために発熱量も大きくなった。しかし、砂質土の場合は、解析結果からも生石灰添加効果は非常に小さいことがわかった。

第5章では浄化メカニズムの解明に取り組み、原位置で粘性土中に生石灰を添加して混合するモデル室内実験を行い、以下のような浄化メカニズムを明らかにした。

1) 粘性土は団粒化することがわかり、VOCはより揮発しやすくなる。

2) 団粒化した土は、消石灰と反応して強固となり、一部、カルシウムアルミネートの塩化物（フリーデル氏塩）が生じる。

3) 加熱された空気と気化 VOC が空隙を上昇する。

第6章では、これまでの研究結果を踏まえて汚染地盤への適用を図り、汚染した表層土と深層粘性土を対象に現場モデル施工と実施工をそれぞれ示した。

表層汚染土の適用事例は、モデル施工として新設工場の基礎掘削土、実施工として廃止工場建屋内の表層土であった。両者とも、室内配合試験で生石灰添加量を決定し、現場においては掘削して仮置した土に生石灰をバケットミキサーで混合して浄化した後、混合土の発熱温度や土中汚染物質濃度の測定をして場内処分をすることを可能とした。

深層汚染粘性土に対しては、第4章の解析モデルも用いて浄化予測をし、さらに、室内試験で生石灰添加量を決定した。現場モデル施工では、数パターンの浄化を行い、汚染物質の回収量から最適な施行条件を決定した。さらに、実施工では、土壤環境基準を満足するという管理基準を設定し、慎重な施工管理を行った。指標としてc-1, 2-DCEを採用し、施工中の回収ガス濃度をモニタリングした結果、大半の改良カラムは、2サイクルで環境基準を達成できた。

以上の基礎研究、解析モデルの作成、浄化メカニズムの検討、さらに現場でのモデル施工と実施工を通じて、従来は浄化が困難とされてきた、表層土と透水係数の低い粘性土層に対する浄化方法を確立した。汚染表層土は、これまで掘削して場外処分されていたが、生石灰で容易に浄化しうることが判明し、そのパフォーマンスは従来にない工法と言える。深層粘性土の汚染は、浄化対策のきわめて難しい汚染事例であるが、今後ますます厳しくなる環境条件において、早期解決を必要とされる浄化条件に対してのアクティブな浄化工法の一つと言える。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約し、今後の課題を整理して示している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、揮発性有機化合物（VOC）で汚染された粘性土地盤に対して、生石灰を用いて浄化する我が国独自の対策工法の開発に取組み、浄化メカニズムの解明と具体的浄化工法の設計施工を試みて、その有効性を確認したものであり、得られた成果は以下の通りである。

- (1) VOC 汚染土の浄化対策として、地盤改良で使われている生石灰を粉体で汚染土に混合する方法を発展させて、生石灰の反応性を汚染浄化に適用したものである。生石灰の水和反応と発熱による含水比の低下効果を利用し、VOCの回収にこれらの発熱・脱水作用、ならびに土とのイオン交換による団粒化を利用できることを実験的・理論的に検証した。
- (2) 汚染土中における生石灰の発熱温度は生石灰添加率に比例するが、その効果は粘性土と砂質土で異なることを示した。さらに、溶液状態のVOCの発熱温度とpHによる気化条件を検討し、高pHでもほぼヘンリー則に依存して気化することを明らかにした。
- (3) 炭素と共有結合した塩素は、高pHで加温すると脱塩素化反応をするため、トリクロロエチレンから毒性の高いジクロロアセチレンが生成することを示し、その生成関係性を誘導し、人体への影響濃度の評価を行った。さらに、生石灰添加による発熱項を導入した移流拡散方程式を用いて浄化予測モデルを作成し、実地盤への適用可能性を予測して、生石灰添加量と発熱温度、土の含水比、汚染物質の回収速度等の関係を解明した。
- (4) 表層汚染土と深層汚染土の現場への適用に際して、試験施工に基づいて施工条件を決定した後に実施工を行った。一般に真空吸引法が適用しにくく、場外搬出して燃焼方法を採用する場合は多い表層汚染土に対し、原位置で生石灰と混合して浄化する方法を開発した。生石灰の添加量と発熱量および浄化率から、適正生石灰添加量を決定し、閉鎖空間内で汚染土と混合して、VOCを回収すると共に、残留VOCを完全に除去することに成功している。深層汚染土では、深層混合機の操作方法の違いによる浄化効率を検討し、貫入時の送気と引抜き時の生石灰添加・攪拌を一サイクルとする繰返しが、効率的な浄化に繋がることを明らかにした。特に、シルト質粘土という従来は原位置浄化が困難であった粘性土地盤でも、浄化目標としての環境基準の達成に成功しており、当該手法の有用性を実証した。

以上要するに、本論文は、生石灰の地盤中での発熱・固化現象に着目して、VOC汚染粘性土地盤の新しい浄化工法を開発して、その浄化メカニズムの解明と具体的設計・施工法の確立を行って、有効性を確認したものであって、学術上、実際

上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年2月3日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。